

1. はじめに

個別要素法 (Distinct Element Method、DEM) は Cundall¹⁾ によって提案された手法で、非連続体の運動を扱う手法の1つである。各粒子を個別の要素の集合としてモデル化し、各要素を剛体として扱い、要素ごとに独立な運動方程式を解くことにより解析を行う。この手法を用いて液状化現象を数値モデル化することを目的として開発を行っているが、今回は2次元個別要素法プログラムの応用として墓石の転倒挙動についてシミュレーションを行う。大地震における墓石の転倒状況の調査では、転倒方向性が確認されており、本研究では、強震記録から実際の地震動を入力することにより転倒方向性の有無を確認する。

2. 多角形要素の個別要素法

多角形要素の場合、要素の頂点と辺のみで接触し、力の伝達を行うとする。接触点に弾性スプリング、粘性ダッシュポッド、スライダを想定することで表現する(図1)。

衝突判定 ある2要素において、まず互いに最も接触する可能性がある面(以下、最寄面)を1つ判定する。互いの頂点は、最寄面でのみ接触するとし、その両端にある2つの頂点と、相手要素の最寄面とで接触判定を行い、その距離に応じて伝達する力を計算する。

3. 運動方程式

頂点において伝達する力は、接触面に垂直な成分 f_n と水平な成分 f_s に分解し、以下の式で表す。

$$f_n = -K_n U_n - h_n \Delta U_n \quad (1)$$

$$f_s = -K_s U_s - h_s \Delta U_s \quad (2)$$

ここに Δt : 時間ステップ, K : バネ剛性, h : 粘性定数、

U : 接触開始点からの変位, ΔU : 時間ステップ間の変位増分
ただし、スライダによって摩擦力の限界を設定し、

$$|f_s| > m f_n \text{ のとき、 } f_s = \frac{f_s}{|f_s|} m f_n \quad (m : \text{摩擦係数}) \quad (3)$$

とする。よって、各要素における要素間伝達力の合力から、下式により加速度 \ddot{u}_x, \ddot{u}_z (以下、一方向 u についてのみ述べる)、角加速度 \ddot{q} を求めることができる。

$$\ddot{u}(t) = F / m, \quad \ddot{q}(t) = M / I \quad (4)$$

ここに F : 各要素に働く合力, m : 要素の質量、

M : 各要素に働く合モーメント, I : 要素の慣性モーメント

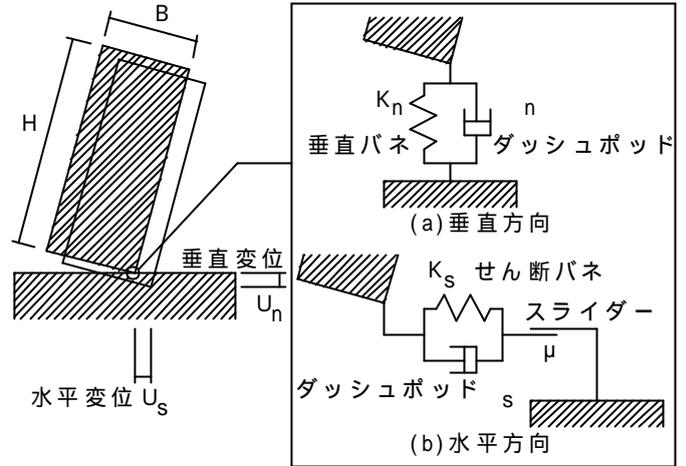


図1 個別要素法のモデル

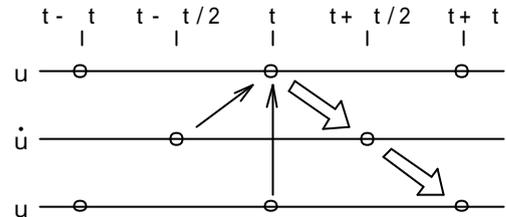


図2 差分近似

4. 数値積分と差分近似

時刻歴の値を電子計算機による四則演算で求めるため、運動方程式を差分近似して用いる。

衝突時の要素間伝達力(式(1)(2))を求める際、変位増分 ΔU は後退差分近似により求めるものとした(図2中の細矢印)。

$$\Delta U(t) = u(t) - u(t - \Delta t) \quad (5)$$

また、求められた伝達力の合力 F と式(4)から、加速度、角加速度を求める。

上記により求められた加速度から下式の数値積分により速度・変位を求める。数値積分には中央差分近似を用いる(図2中の太矢印)。

$$\dot{u}(t + \Delta t / 2) = \dot{u}(t - \Delta t / 2) + \ddot{u}(t) \Delta t \quad (6)$$

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \dot{u}(t + \Delta t / 2) \Delta t \quad (7)$$

角加速度から角速度・回転変位を求める場合も同様。

ゆえに、初期条件として時刻 t の変位ならびに時刻 $t - \Delta t / 2$ の速度を与え、を繰り返すことにより、漸進的に時刻歴の応答値を求めることができる。

5. ポストプロセッサの作成

計算結果は時刻歴の数値データであるので、視覚化のためにポストプロセッサを作成した。言語は、画像出力のクラスライブラリが言語規約として存在する Java 言語を用いた。また、マルチスレッドを用いることにより、時刻歴の挙動を GUI 環境においてアニメーション表示させた (図 3)。

6. 墓石転倒モデル

長方形要素が 2 要素重なっている状態とした。上側要素には鉛直下向きに重力加速度を加算し、下側要素は鉛直方向の加速度ならびに角加速度を 0 として固定する。さらに、下側要素の水平加速度として正弦波もしくは地震動を入力し、上側要素の転倒をポストプロセッサにより確認する。解析に用いるバネ定数は、バネの柔性の影響をうけないよう十分剛とした。また、減衰定数は 3500Ns/m、摩擦係数はロッキングによる転倒を表現するため 1.0 とした。

7. 入力地震動と転倒方向性

使用する地震動は、KiK-net²⁾ における鳥取県西部地震のものを用いた (図 4 TTRH02 日野 2000.10.16-13:30 地図は K-NET³⁾ による)。墓石の転倒方向性の資料⁴⁾ から、震源における断層方向の直行成分 N60E 方向への転倒方向性を調べる。N-S 成分と E-W 成分の地震動を合成し、N60E 成分と、断層方向との水平成分 N30W 成分の地震動を作成した。各成分の性質 (表 1、図 5) より、最大加速度の大きさ、卓越周期の長さにおいても N60E 成分がより転倒しやすいと言える。それぞれ水平入力動としてモデルに入力した場合についての転倒を比較する。結果は、 $B/H = 0.4$ の墓石⁴⁾ で、N60E 方向では転倒し、N30W 方向では転倒しなかった (図 6)。

8. まとめ

解析の結果、N60E 方向への転倒方向性が確認された。今後は墓地における調査結果との比較のため、軟弱地盤による地震波の増幅などの検討を行い、実際の墓地の場所における地震動に近い形でのシミュレーションが必要であると考える。

【参考文献】

- 1) P.A.Cundall, O.D.L.Strack: "THE DISTINCT ELEMENT METHOD AS A TOOL FOR RESEARCH IN GRANULAR MEDIA PART I, REPORT TO THE NATIONAL SCIENCE FOUNDATION CONCERNING NSF GRANT ENG76-20711, 1978.11
- 2) <http://www.kik.bosai.go.jp/> 3) <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 4) 鳥取大学工学部土木工学科 平成 12 年鳥取県西部地震調査結果 <http://www.str.cv.tottori-u.ac.jp/torisei/>

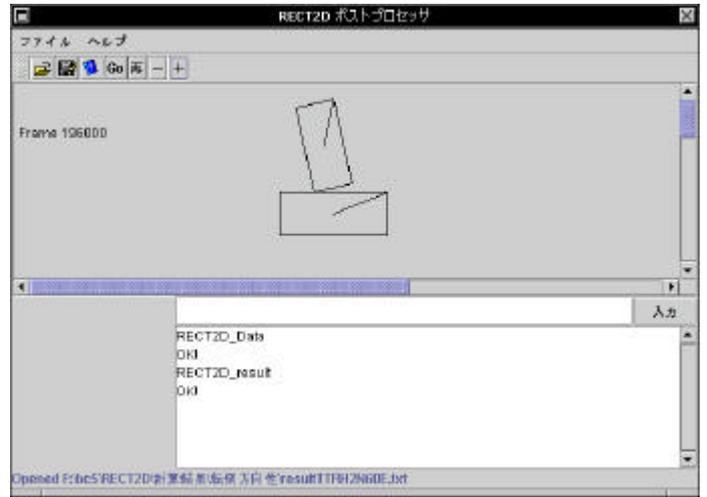


図 3 GUI フロントエンドによるポストプロセッサ

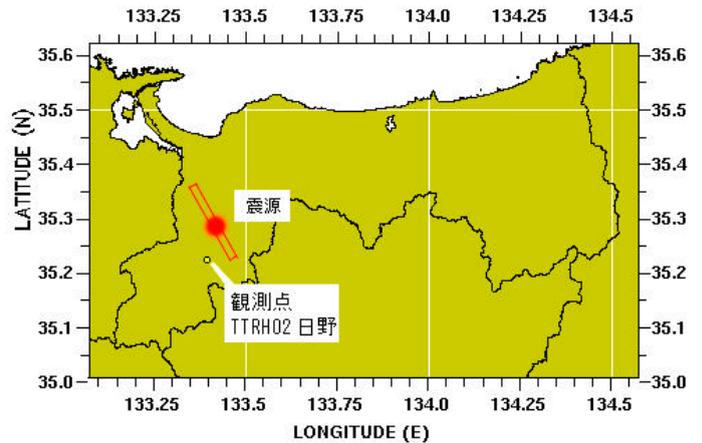


図 4 震源と観測点位置

表 1 入力地震動の性質

成分	最大加速度(Gal)	最大速度(cm/s)	最大変位(cm)
N60E	1023.3	118.7	30.8
N30W	580.6	69.5	20.1

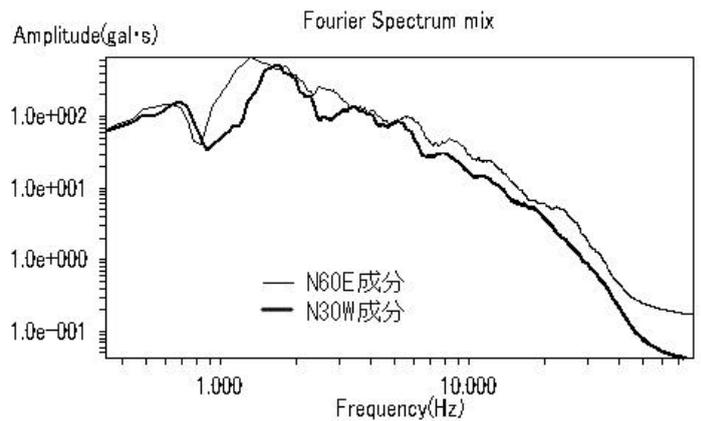


図 5 入力地震動のフーリエスペクトル³⁾

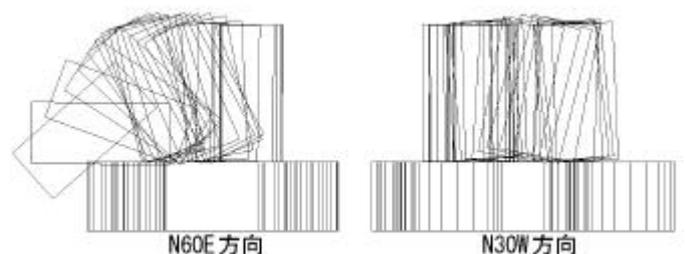


図 6 応答結果